11593

+. 1-7

III

DER HYDRAULISCHE

BOHR-WIDDER

VON

W. WOLSKI
INGENIEUR.

DER HYDRAULISCHE

BOHR-WIDDER

VON

W. WOLSKI
INGENIEUR.

Hydraulische Bohrung im Allgemeinen.

Es gibt wol kein technisches Gebiet, auf welchem das Princip der hydraulischen Kraftübertragung mehr Vortheile bieten würde, als das der Bohrtechnik.

Wenn man die bisher bekannten Theilgebiete derselben: das der Tiefbohrung, der Schachtbohrung, der Horizontal- und der Gesteinsbohrung der Reihe nach durchgeht, kann man sich kaum der Überzeugung verschliessen, dass dem genannten Principe speciell hier eine ganz hervorragende Rolle und Zukunft vorbehalten erscheint.

Tiefbohrung.

Bei allen bisher bekannten Schlagbohrsystemen erhält der Meissel seine Bewegung durch Vermittlung des Gestänges, an welchem er hängt. Dieses entweder massive oder hohle, oben am Schwengel befestigte Gestänge führt mit diesem und mit dem Meissel die auf- und abwärts gerichtete Stossbewegung aus.

Das Princip der hydraulischen Bohrung beruht dagegen darauf, dass nicht das Gestänge, sondern der dasselbe durchfliessende Druckwasserstrom den Meissel an der Sohle mittelst eines Motors in Bewegung setzt, wobei das im Motor verbrauchte und nunmehr aufsteigende Druckwasser zur Spülung des Bohrlochs dient. Das Umsetzen und Nachlassen des Meissels erfolgt entweder automatisch oder von Hand aus mittelst des Gestänges, an welchem der Motor mit dem Meissel aufgehängt ist.

Aus dieser neuen Anordnung ergibt sich eine Reihe von weitgehenden Vorteilen. Wenn die gewaltige Masse des Gestän-

ges, welche, zumal bei etwas tieferen Bohrungen, die Masse der eigentlich schlagenden Theile (d. i. Meissel und Bohrstange) viele Male übertrifft, weder an der raschen Auf- und Abbewegung noch an den Erschütterungen des Schlages theilnimmt, so gewinnt man:

1) Grössere Betriebssicherheit, weil ein ruhig hängendes Gestänge von den Brüchen, dem gefährlichsten Feinde jeder Tiefbohrung, unbedingt verschont bleibt.
2) Schonung des Inventars, weil hier die gewaltigen Erschütterungen wegfallen, die sonst in kurzer Zeit das eiserne Gestänge mürbe und brüchig machen, den Bohrkran locker schlagen etc. Auch werden hier die Futterrohre nicht durchgewetzt, wie bei allen anderen schlagenden und drehenden Bohrsystemen.
3) Unabhängigkeit von der Teufe, weil die mechanischen Bedingungen der Meisselbewegung dieselben bleiben, ob man in 10 oder 1000 Meter Tiefe arbeitet.
4) Vorteilhaftere Kraftübertragung, weil die durch den Druckwasserstrom nach der Sohle vermittelte Betriebskraft hier ganz und ausschliesslich zur Bewegung der arbeitenden Theile dient, anstatt sich in der unnötigen Arbeit der Gestänge-Bewegung, Stösse u. dgl. grossentheils zu verlieren.
5) Die Spülung des Bohrloches durch das im Motor verbrauchte Druckwasser — und zwar eine sehr ausgiebige — ergibt sich hier von selbst, gleichsam als Nebenvortheil, während bei den anderen Bohrsystemen Dampfmaschine und Pumpe gleichzeitig arbeiten müssen.
6) Die Möglichkeit einer unbegrenzten Steigerung des an die Sohle abgegebenen mechanischen Effectes, jenes Factors, welcher in erster Linie für den Fortschritt der Bohrung massgebend ist. Bei den bisherigen Tiefbohrsystemen ist sowol die Zahl der Meisselschläge als auch die Kraft eines jeden einzelnen Schlages — eben mit Rücksicht auf die grossen hin- und herzubewegenden Massen — an eine gewisse praktisch nicht überschreitbare Grenze gebunden, deren Höhe ich auf etwa 450 *mgk/sek* (6 *HP*) Gesammteffect schätzen würde[1]). Hier, wo die Abgabe der Arbeit unmittelbar an den Meissel und an der Sohle selbst erfolgt, ist keine derartige Beschränkung vorhanden. Die Zahl und die Stärke der Schläge kann durch Erhöhung des Druckes und

der Druckwassermenge nach Belieben gesteigert werden. So geben z. B.:

5 l/sek bei *20 Atm.* Druck: *1000 mkg/sek (13·3 HP)*
8 l/sek bei *25 Atm. 26·6 HP*

7) Weitere praktische Vortheile: Das Gestänge bleibt während der Bohrarbeit am Förderseile hängen, braucht demnach nicht jedesmal an den Schwengel an- und ausgekuppelt zu werden. Man kann die ganze Stangenlänge (10—15 *m*) ohne Unterbrechung auf einmal abbohren, was von Bedeutung ist, weil jede Unterbrechung der Spülung sofort ein Setzen der im Wasser schwebenden Schlammtheilchen zur Folge hat, so dass man sie wieder ausarbeiten muss. Vereinfachung des Bohrkrahns (weil der Schwengel wegfällt), leichtere Konstruktion (weil keine Erschütterungen), schnellere Montirung u. a.

Schachtbohrung.

Bei dem heutigen Stand des Bergbaues werden die grossen Schächte, wie bekannt, vorwiegend von Hand aus unter Zuhilfenahme der Sprengmittel abgeteuft. Wo starke Wasserzuflüsse oder schwimmendes Gebirge die Handarbeit ausschliessen und auch die künstliche Frostmauer zum Schutze der Arbeiter sich nicht aufbauen lässt (warme oder salzige Gewässer), erscheint die Bohrung wol als das einzige Mittel, den Schacht weiter zu treiben.

Die Schachtbohrtechnik hat seit einem halben Jahrhunderte keine wesentlichen Änderungen erfahren. Trotz mannigfach abgeänderter Details steht sie heute, wie in den guten 50-er Jahren, auf dem Standpunkte des Kind- und Chaudron'schen Freifall-Instrumentes, eines ausserordentlich (bis 30 *t*) schweren unten mit einer Anzahl von Schneiden besetzten Fallkörpers, welcher von einem gewaltigen Gestänge etwa 15 mal in der Minute angehoben und fallen gelassen, das Gebirge zermalmt.

Der verhältnismässig sehr langsame Fortschritt, die häufigen Unfälle und im Zusammenhange damit der hohe Meterpreis dieses Verfahrens veranlasste die Herren E. Frieh und R. Nöllen-

burg in Nordhausen, einen principiell anderen Weg einzuschlagen. (D. R. P. Nr. 158751 vom 15 April 1903). Sie ersetzten den einen gewaltigen Fallkörper durch eine grosse Anzahl einzelner Schlag-Apparate *A* (Fig. 12) welche in einem gemeinsamen ruhig rotirenden Gehäuse *G* befestigt und in geeigneter Weise angetrieben, die Bohrarbeit besorgen. Die Sohle wird durch Spülung rein erhalten. Das durch das Hohlgestänge *H* zugeleitete Spülwasser durchströmt das kesselförmige Gehäuse *G*, bestreicht die Sohle und steigt an den Wänden des Schachtes auf. Der an dieser Stelle durch das Gehäuse *G* bedeutend verengte Querschnitt bedingt eine verhältnissmässig hohe Wassergeschwindigkeit und begünstigt damit die Spülung. Oberbalb des Gehäuses lässt die Strömung, dem grossen Querschnitte entsprechend, nach und veranlasst die gröberen Schmand-Theilchen, sich in einem über dem Gehäuse befestigten Sediment-Kessel *S* abzusetzen.

Der evidente Vortheil dieser neuen Anordnung liegt in der grossen durch die Unbeweglichkeit des Gestänges gewonnenen Betriebssicherheit in der Möglichkeit einer fast unbegrenzten Steigerung des den Schlag-Apparaten übermittelten mechanischen Effectes, somit auch der Bohrleistung und in der Anwendung einer ausgiebigen Spülung, welche sonst, dh. ohne das eingetauchte Kessel-Gehäuse, infolge des grossen Querschnittes und der verschwindend kleinen Wassergeschwindigkeit bei Schachtbohrungen so gut wie gar nicht zur Geltung kommen konnte. Diese Vortheile genügen jedenfalls, um an die neue Bohrmethode die weitgehendsten Erwartungen und Hoffnungen knüpfen zu lassen.

Was nun den Antrieb der Schlagapparate anbelangt, so ist allerdings in der Patentschrift Elektricität, Gas, Druckluft und Druckwasser in Aussicht genommen worden; aber es scheint bei näherer Betrachtung nur der hydraulische Antrieb der Einzelbohrer hier ernst in Frage zu kommen und zwar aus Gründen, welche theils unmittelbar einleuchten, theils zu etwas weitläufigen Erörterungen führen müssten. Es genüge hier der Hinweis auf den ausserordentlichen Vortheil einer Anordnung, welche das Gestänge, die Kraftleitung und die Spülleitung in einem einzigen Rohrstrange vereinigt. Die Erfinder haben auch thatsächlich bei der Verwirklichung ihrer Idee zum hydraulischen Antrieb gegriffen.

Horizontalbohrung.

Die zur Herstellung horizontaler und geneigter Bohrlöcher von grossem Durchmesser und verhältnismässig geringer Teufe (Wasser- und Wetterlöcher) oder zum Ausbohren ganzer Stollen dienenden Bohrapparate lassen sich mit Vorteil hydraulisch antreiben, weil man dazu das in der Grube fast immer vorhandene Druckwasser direkt verwenden und die Spülung und Abführung des zerbohrten Gesteins dem im Motor verbrauchten Wasser überlassen kann.

Gesteinsbohrung.

Das Princip des hydraulischen Antriebes lässt sich mit gleichem Vortheile auch zum Bohren seichter (1—2 *m* tiefer) Sprenglöcher und zum Schrämmen verwenden.

Bekanntlich gelangen die Gesteinsbohrmaschinen im Bergbaue, in Steinbrüchen und bei Tunnelbauten zu immer grösserer Bedeutung und verdrängen nach und nach die langsame und theuere Handarbeit. Zum Betriebe dieser Maschinen dient (ausnahmsweise) Dampf, Druckluft, Elektricität und Druckwasser. Dieses Letztere gelangte bisher ausschliesslich bei drehenden Bohrmaschinen zur Anwendung (System Brandt, Jarolimek), welche bei allen ihren sonstigen Vortheilen schwer und theuer sind, grössere Stollen-Querschnitte erheischen, unheimlich hohe Wasserdrücke in der ganzen Leitung und (wegen des ungeheueren Druckes der Krone) eine sehr starke Montirung erfordern.

Hydraulische Schlagbohrapparate schienen (mit Rücksicht auf die Wasserschläge) geradezu ausgeschlossen und somit das Druckwasser als Antriebskraft für Gesteinsbohrmaschinen unendlich beschränkt.

Und doch scheint gerade dieses Element für den gegebenen Zweck am vorteilhaftesten zu sein. Bei Tunnelbauten lässt sich meistens Wasser aus hoch gelegenen Quellen, Seen und Bächen zuleiten und zwar mit natürlichem Drucke von vielen Atmosphären, so dass es direkt zuu Betriebe der Bohrmaschinen verwendet werden kann. Im Bergbaue steht fast immer Druckwasser in beliebiger Menge zur Verfügung; es genügt dasselbe dem Wasser-

haltungsrohre zu entnehmen und nach geleisteter Bohrarbeit wieder nach dem Sumpfe zu leiten. Dann besorgt natürlich die Wasserhaltungsmaschine mittelbar die Bohrarbeit resp. Schrämmarbeit und sind keine besonderen Kraftanlagen (elektrische Centralen, Luftcompressoren) nötig. Ausserdem ist zu beachten, dass man auch sonst zur Spülung der Bohrlöcher, zur Beseitigung des zersprengten Materials, zum Niederschlagen des Bohrstaubs etc. Wasser bis vor Ort zuleiten muss. Hier ist Kraft- und Wasserleitung vereinigt, indem das verbrauchte Druckwasser zur ausgiebigsten Spülung der Bohrlöcher verwendet werden kann. Die Sache ist besonders dort von Wichtigkeit, wo das gebohrte Gebirge leicht Staub entwickelt, welcher (zumal durch den Auspuff der Druckluftmaschinen aufgewirbelt) die Lungen der Arbeiter auf das Gefärlichste bedroht*).

Der pneumatische Antrieb zeigt bekanntlich den principiellen Übelstand eines verhältnismässig sehr geringen Wirkungsgrades (7 bis 22% ohne Berücksichtigung der Leistungswiderstände**).

Die elektrischen Schlagbohrmaschinen mit Kurbelantrieb ergeben einen sehr guten Wirkungsgrad, konnten aber bisher leider aus anderen praktischen Gründen eine gewisse Grenze der Arbeitsleistung (etwa 2 *HP)* nicht recht überschreiten. Auch bietet der elektrische Antrieb für gasreiche Gruben (also vor Allem Kohlengruben) immerhin etwas Bedenkliches.

Alle diese Übelstände und Beschränkungen fallen bei hydraulischer Kraftübertragung weg.

---

*) Wie schwerwiegend dieser Übelstand werden kann, mag aus der Thatsache geschlossen werden, dass die Behörden einiger Länder (Süd-Afrika u. a.) in der letzten Zeit einen Konkurs auf eine Gesteinsbohrmaschine ausschrieben, welche keinen Staub aufwirbelt resp. auf eine Vorrichtung zum Niederhalten desselben. Bei günstigem Ergebnisse würden diese dann wahrscheinlich obligatorisch eingeführt werden.

**) Siehe: Dolezalek: Tunnelbau.

Widder-Bohrapparat.

Die Vorteile der hydraulischen Kraftübertragung waren so einleuchtend, dass man, besonders in Tiefbohrkreisen, schon seit längerer Zeit mit der Konstruktion eines Druckwasser-Motors mit Schlagwirkung sich befasste. Die ersten diesbezüglichen Patente stammen meines Wissens aus den Jahren 1867 (Balzberg) und 1880 (Hoppe) und die letzten 10 Jahre brachten viele neue Vorschläge, von denen aber bisher keiner sich befähigt erwies, das Gebiet der Projekte zu überschreiten. Die constructive Schwierigkeit, welche sich der Anwendung eines kräftigen Wassermotors für schnell aufeinander folgende Schläge in den Weg stellt, liegt — abgesehen von der engen Dimension des Bohrlochs, vom Sandgehalte des Druckwassers und von den sonst schwierigen Betriebsbedingungen, welche jede complicirtere Construction im Vorhinein ausschliessen — vor Allem in der Natur des kraftübertragenden Mediums, welches schwer und fast unzusammendrückbar ist. Einer jeden Unterbrechung und Änderung in der Bewegungsrichtung folgt notwendig ein mehr oder minder heftiger Schlag des in den Rohren und im Motor enthaltenen Wassers und diese Erscheinung, deren Gewalt mit der Schnelligkeit der Bewegung rapid zunimmt, begrenzt einerseits die Geschwindigkeit (also die Kraft) des Meisselschlages, andererseits die Anzahl der mit einem gewöhnlichen Wassermotor praktisch ausführbaren Schläge auf etwa 150, vielleicht noch 200 in der Minute.

Widder-Princip.

Nun glaube ich dem Probleme der hydraulischen Bohrung mit meinem Bohrwidder*) eine ebenso wirksame als einfache Lö-

*) Patent Wolski: Öst.: 4010, D. R. P.: 135322, Frankr.: 303465, Engl.: 15017, Amer.: 699273 etc.

sung gegeben zu haben, welche es ermöglicht 600, 1000 und mehr beliebig kräftige Schläge in der Minute auszuführen. Nachdem es nicht möglich war, den Wasserschlag zu beseitigen, habe ich denselben verwerthet. Der Bohrwidder beruht (ähnlich wie der bekannte zum Wasserheben benützte hydraulische Widder) auf dem Stosse einer plötzlich aufgehaltenen Wassersäule, wobei die Hemmung durch momentanen Schluss eines zuvor offenen Ventils erfolgt. Der von der Pumpe erzeugte Druck wirkt hier nicht direkt auf den Meissel, sondern dient zunächst zur Beschleunigung der zum Schlage bestimmten Wassersäule, welche erst im geeigneten Augenblicke ihre lebendige Kraft durch elastischen Stoss auf den Meissel überträgt.

Fig. 1 stellt die Einrichtung des Apparates (natürlich ganz schematisch) dar. Das Druckwasser strömt durch das Zuleitungsrohr *D* und den Windkessel *B* in das Schlagrohr *U*. Am Ende dieses Letzteren verzweigt sich die Leitung. Auf der einen Seite ist der Ausfluss durch ein selbsttätiges, von der Feder *f* offen gehaltenes Ventil *W*, auf der zweiten durch den Kolben und die Pufferfeder *Z*, auf der dritten endlich durch den Kolben *O* geschlossen, welcher gleichzeitig die Schwerstange für den mit ihm verschraubten Meissel *S* bildet. Eine kräftige Feder *F* ist bestrebt, die Schwerstange mit dem Meissel stets hoch zu heben.

Wenn nun die Pumpe einen Wasserstrom durch das Gestänge schickt, so findet dieser anfänglich durch das offene Ventil *W* freien Ausfluss. Hat aber das Wasser eine gewisse Geschwindigkeit erreicht, so übt es auf die Ventilplatte von oben einen so grossen Druck aus, dass der Widerstand der Feder überwunden und die Platte plötzlich auf ihren Sitz geworfen wird. In diesem Augenblicke erfolgt der Wasserschlag. Die in Bewegung befindliche und nun plötzlich aufgehaltene Wassersäule im Rohre *U* stösst auf den Kolben *O* und wirft ihn mit grosser Gewalt gegen die Sohle des Bohrlochs. Gleichzeitig wird der Puffer *Z* duch die plötzliche Druckzunahme zusammengedrückt. Hat aber die lebendige Kraft der Wassersäule durch Ausübung dieser Arbeit sich erschöpft, so beginnt die Reaction. Der Puffer *Z* dehnt sich wieder aus und wirft die Wassersäule *U* zurück, wodurch der Druck der Pumpe resp. der im Windkessel enthaltenen Luft in seiner Wirkung auf das Ventil für einen Augenblick aufgehoben wird. Diesen Moment benützt die Feder *f*, um die Ventil-

platte von ihrem Sitze loszureissen. Der Ausfluss für das Wasser wird wieder frei und die Säule *U* beginnt nun infolge des im Windkessel herrschenden Druckes wieder die beschleunigte Bewegung nach unten. Gleichzeitig strebt der Meissel, welcher inzwischen den Schlag auf die Sohle ausgeübt hat, unter dem Einflusse der Feder *F* wieder in die Höhe, bis ihn ein erneuter Wasserschlag zur Umkehr zwingt.

Der Puffer *Z* erweist sich indessen als überflüssig; die eigene Elasticität des Wassers übernimmt seine Rolle. Im Augenblicke des Ventilschlusses drückt sich die Wassersäule unter dem Einflusse des eigenen durch den Schlag erzeugten Druckes auf einen Moment zusammen und stösst hierauf, sich wieder ausdehnend, entgegen dem Drucke der Pumpe von unten ab. Die momentane zwischen den beiden auseinander prallenden Massen (Meissel und Wassersäule) entstehende Verdünnung bedingt jedesmal die Wiederöffnung des Ventils.

Fig. 2 bringt eine andere Ausführungsform des Bohrwidders zur schematischen Darstellung, bei welcher das Ventil mit dem Meissel verbunden ist und an der Bewegung desselben theilnimmt. Überhaupt lässt hier die Anordnung der einzelnen Theile viele constructive Varianten zu.

Der Bohrwidder stellt jedenfalls eine sehr einfache — vielleicht die möglichst einfachste — Form einer Wassersäulenmaschine vor und zwar eine speciell für schnelle Schlagbewegung geeignete. Eine Ventilplatte, ein Kolben und zwei Federn bilden die einzigen beweglichen Theile derselben. Bei kleineren Dimensionen kann man Ventilplatte und Ventilfeder durch ein einziges elastisches Stahlplättchen ersetzen (ähnlich der Zunge einer Pfeife) wodurch die Construction sich noch weiter vereinfacht.

Das Widder-Princip löst auch in einfacher Weise die constructive Schwierigkeit der engen Dimension bei Tiefbohrlöchern. Nachdem nämlich hier nicht der Druck der Pumpe direct sondern der 5 bis 10 mal höhere Druck des Wasserschlages (siehe den nächsten Abschnitt) auf den Kolben zur Geltung kommt, so kann die Kolbenfläche 5—10 mal kleiner bemessen werden. Ein Kolben von 20 cm^2 Fläche (50 *mm* Durchmesser) gibt schon einen wirksamen Druck von 2000 bis 4000 *kg*.

Bei den bisherigen Bohrsystemen schlägt eine sehr grosse Masse (500—1500 *kg*) mit geringer Geschwindigkeit gegen die

Sohle. Hier wird umgekehrt der Effect durch kleine Massen (30—70 *kg*) und hohe Geschwindigkeiten (von 4 *m* aufwärts erreicht*). Den gewaltigen Kräften und kleinen Massen entspricht eine überaus rasche, schussartige Übertragung und Ausladung der Energie und ein Schlagtempo (8—15 in der Secunde) wie es sonst auch nicht annähernd zu erreichen wäre.

Das Öffnen und Schliessen des steuernden Ventils erfolgt momentan und fast ohne jedes Druckgefälle im Gegensatze zu jeder zwangläufigen Steuerung. Dies schliesst alle damit zusammenhängenden, sonst unvermeidlichen und bedeutenden Arbeitsverluste aus.

Der Motor verträgt jedes trübe sandführende oder salzige Wasser, wie eben ein solches bei Spülbohrungen schwer zu vermeiden ist.

Auch der Umstand, dass das steuernde Ventil ausser Arbeit immer offen ist, bildet einen praktischen Nebenvorteil der Construction, weil man jederzeit von der Bohrung zur blossen Spülung übergehen kann**) und das Gestänge beim Fördern immer leer ist.

Die Stärke des Wasser- also auch des Meisselschlages lässt sich nach freier Wahl reguliren

1) durch die Einstellung des Ventils;
2) durch die Länge des Schlagrohres.

Der Wasserschlag.

Ich habe i. J. 1900 in der Zeitschrift des Lemberger Polytechnischen Vereines***) meines Wissens zum ersten Male die Gesetze des Wasser-Schlages aufgestellt und wissenschaftlich begründet. An dieser Stelle seien die Hauptergebnisse dieser Theorie in Kürze wiedergegeben mit der Bemerkung, dass direkte Messungen eine vollständige Übereinstimmung mit den theoretisch abgeleiteten Zahlen ergeben.

---

*) Über den daraus sich ergebenden Unterschied in der Wirkung der Schneide in hartem Gebirge siehe meine Abhandlung „*Über die Bohrstange*“ „*Glückauf*“ (Essen) 1901, Nr. 10.

**) Siehe im Folgenden den Abschnitt über Druck und Wassermenge.

***) „Czasopismo techniczne“ 1900 Nr. 25.

Das Wasser ist bekanntlich ein elastischer Körper, welcher unter dem Drucke einer Atmosphäre sein ursprüngliches Volumen um $\frac{48}{1,000.000}$ oder rund um $\frac{1}{20.000}$ verringert*). Die in einem Rohre enthaltene Wassersäule stellt eine elastische Reihe gleichmässig vertheilter Massenpartikel vor. Wenn eine solche mit der Geschwindigkeit *c* sich bewegende Säule plötzlich ein festes Hindernis findet, so entsteht unter dem Einflusse des Stosses zunächst in den vordersten, dann in immer weiteren Theilen der Säule eine Verdichtung und ein entsprechender Druck. Die Grösse desselben (*A* in Atm.) hängt einzig und allein von der Schlaggeschwindigkeit *c* ab, ist dagegen von der Länge der Säule vollständig unabhängig[2]).

$$A = 14{\cdot}4\ c \qquad \text{I.}$$

Wenn das Hindernis nicht fest ist, sondern mit der Geschwindigkeit *v* zurückweicht, so beträgt der durch den Wasserschlag erzeugte Druck nur

$$A = 14{\cdot}4\ (c-v) \qquad \text{II.}$$

Die Verdichtung pflanzt sich als elastische Welle von den vordersten Theilen der Säule gegen das rückwärtige Ende derselben fort und zwar mit der Geschwindigkeit

$$V = 1443\ m/sek \qquad \text{III.}$$

d. i. der Geschwindigkeit des Schalles im Wasser.

Hat die elastische Welle die ganze Länge *L* der Wassersäule durchlaufen, so erfolgt am freien Ende derselben, also an der Grenz-Fläche des dichteren und dünneren Mediums, die Reflexion der Welle. Der durch den Wasserschlag erzeugte Druck, welcher sich soeben vom festen Hindernisse bis an dieses entgegengesetzte Ende der Wassersäule fortgepflanzt hat, verwandelt sich hier plötzlich in die äquivalente Geschwindigkeit, mit welcher zunächst die letzten und dann immer weitere Theilchen der Säule zurückgeworfen werden. Nach der Ausdrucksweise der Akustik hebt die nunmehr als Verdünnung zurückkehrende Welle durch Interferenz die bisher bestehende Verdichtung Schritt für Schritt auf, bis endlich der ganze Druck in der Wassersäule aufgehoben

---

*) Die Elastizität der Rohrwände vergrössert die Zusammendrückbarkeit der Wassersäule nicht mehr als um einige Milliontel.

und in die äquivalente Geschwindigkeit umgesetzt ist. Die zurückgeworfene Wassersäule entfernt sich nun mit derselben Geschwindigkeit c vom festen Hindernisse, mit welcher sie gegen dasselbe angefahren war. Es entsteht hier plötzlich eine Verdünnung welche an Grösse der bisher vorhandenen Verdichtung gleichkommt*).

Der durch den Wasserschlag erzeugte Druck hat so lange gedauert, als die elastische Welle gebraucht hat, um die ganze Länge L der Säule zu durchlaufen und zurückzukehren. Demnach dauert der Wasserschlag in Secunden.

$$T = \frac{1}{722} L \qquad \text{IV.}$$

Fig. 3 zeigt graphisch den Verlauf der Erscheinung. Es ist hier eine Wassersäule von der Länge 7.22 m in Zeitabständen von $\frac{1}{1000}$ Sekunde von dem Momente des ersten Zusammenstosses mit einem festen Hindernisse dargestellt. Die Schlaggeschwindigkeit wurde $c = 12\ m$ pro Sekunde angenommen. Die obere Reihe stellt graphisch nach dem beigefügten Masstabe die in jedem Momente des Stosses in den einzelnnn Theilen der Säule auftretenden Spannungen und zwar links die positiven (Druck) rechts die negativen (Verdünnung). Der unteren Reihe entnimmt man (nach einer zweiten Skala) die Geschwindigkeiten der einzelnen Wasserteilchen und zwar links die positiven (nach unten) rechts die negativen (nach oben).

Die Wassersäule verliert, wie aus dem Diagramme ersichtlich, durch den Zusammenstoss mit einem festen Hindernisse, nichts von ihrer lebendigen Kraft, sie ändert lediglich ihre Bewegungsrichtung.

$$c' = -c \qquad \text{V.}$$

was auch unmittelbar einleuchtet, nachdem der Stoss ein elastischer war und nach aussen keine Arbeit geleistet worden ist.

Anders, wenn das Hindernis während des Stosses mit der (constanten) Geschwindigkeit v zurückweicht. Dann beträgt der

---

*) Es versteht sich, dass die Verdünnung nur so weit reichen kann, als der umgebende Druck es bedingt, also im Tageshorizonte 1 *atm*, bei 500 m Teufe: 51 *atm* u. s. w. Fällt die Verdünnung grösser aus, so erfolgt ein förmliches Losreissen der zurückprallenden Wassersäule vom Hindernisse, wörtlich ein Vacuum.

Druck (wie bereits oben erwähnt) nur $A = 14 \cdot 4\ (c - v)$ und die Endgeschwindigkeit nach dem Rückprall (wie bei jedem elastischen Stosse überhaupt)

$$c' = -c + 2v \qquad \text{VI.}$$

Die Arbeitsmenge, welche sich während des Stosses von der Wassersäule auf das zurückweichende Hindernis übertragen hat, wird sein (wenn Q in cm^2 den Querschnitt der Säule bezeichnet) in *mkg/sek.*

$$E = 14 \cdot 4\ Q\ (c - v)\ v \qquad \text{VII.}$$

Die Übertragung der Arbeit ist am ausgiebigsten, wenn der Ausdruck: $(c - v)\ v$ sein Maximum erreicht d. i. wenn

$$v = {}^1/_2\ c \qquad \text{VIII.}$$

Dann ist die Geschwindigkeit des Rückpralls

$$c' = 0 \qquad \text{IX.}$$

Nach beendetem Stosse steht die Wassersäule still und hat ihre ganze lebendige Kraft als Arbeit auf das zurückweichende Hindernis (z. B. einen Kolben) übertragen.

Fig. 4 stellt graphisch den Verlauf dieser Erscheinung vor.

In dem Falle, der uns vor allem interessirt, beim Bohrwidder, ist das Hindernis (der Kolben) weder fest noch weicht es mit constanter Geschwindigkeit zurück. Die Kolbengeschwindigkeit ist hier variabel. Die Wassersäule stösst mit der trägen Masse des Meissels zusammen, welche eben unter dem Einflusse der Feder F (Fig. 1) in die Höhe schnellt. Durch den Stoss und im Laufe desselben ändert sich die Geschwindigkeit v des Kolbens succesive; sie ist zuerst negativ, erreicht in einem Momente den Wert $= 0$ und wächst dann ins Positive.

Fig. 6 zeigt ein Bild der Bewegung, wie es aus den berechneten Gleichungen[3]) sich ergibt. Es wurde dabei angenommen:

Die Schlaggeschwindigkeit des Wassers $c = 12\ m$
Rückzuggeschwindigkeit des Meissels $v_0 = -6$
Querschnitt der Wassersäule und des Kolbens $Q = 10\ cm^2$
Gewicht des Meissels $= 10\ kg.$

Die nach oben eilende Masse wird durch den Wasserschlag allmälig aufgehalten, bis sie nach Ablauf der Zeit $= 0{\cdot}00285$ *sek* zur Ruhe kommt $(v = 0)$ und dabei den höchsten Punkt H $(y = 0{\cdot}80\ cm)$ erreicht. Von nan an beginnt die Beschleunigung nach abwärts. In dem Maasse aber, als die Geschwindigkeit v wächst, wird der Druck der Wassersäule auf den Kolben, also auch die Beschleunigung der Masse immer kleiner. Die Geschwindigkeit v des Kolbens nähert sich asymptotisch der Schlaggeschwindigueit c, ohne sie je überschreiten oder auch nur erreichen zu können. Dies wird im Zeit-Weg-Diagramme (Fig. 6 I.) durch die schiefe Asymptote, im Zeit-Geschwindigueits-Diagramme (Fig. 6 II.) durch die horizontale, in der Entfernung $v = c$ gezogene Asymptote veranschaulicht.

Das dritte Diagramm (Fig. 6 III.) zeigt graphisch die in jedem Augenblicke des Stosses in der Masse aufgespeicherte lebendige Kraft

$$E = \tfrac{1}{2}\, m\, v^2 \qquad \text{X.}$$

also die Arbeit, welche succesive von der Wassersäule auf den Kolben sich überträgt. Die lebendige Kraft wächst anfangs langsam, dann immer schneller. Die Zunahme ist am bedeutendsten, wen $v = \tfrac{1}{2}\, c$ (Punkt W). An dieser Stelle hat die Curve einen Wendepunkt. Von nun an wird ihre Neigung gegen die Abscissenaxe immer geringer, die lebendige Kraft wächst immer langsamer, um endlich asymptotisch sich einer gewissen Grenze zu nähern, welche der Geschwindigkeit $v = c$ entspricht (horizontale Asymptote).

Fig. 5 stellt graphisch in Zeitintervallen von $\frac{1}{1000}$ Sekunde die Verteilung von Druck und Verdünnung (obere Reihe) sowie die Geschwindigkeiten (untere Reihe) in den einzelnen Theilen einer Säule vor, welche gegen eine träge Masse angefahren war. Dabei wurde die Länge der Wassersäule $7{\cdot}2\ m$ und die Masse des Meissels $7{\cdot}2\ kg$ angenommen*).

Man kann sich sowol durch Rechnung, als auf Grund der obigen Diagramme**) leicht überzeugen, dass die in der Masse

*) Siehe im Folgenden den Abschnitt über den Zusammenhang zwischen der Masse des Meissels und der Länge der Wassersäule.

**) Druck und Geschwindigkeit der Wasserteilchen sind äquivalent. Das Vorzeichen kommt dabei nicht in Betracht, weil es sich um die Summe

des Meissels und in allen Theilen des Wassersäule enthaltene Summe der potentiellen und der kinetischen Energie jederzeit d. i. vor, während und nach dem Stosse immer dieselbe bleibt. Es konnte auch nicht anders sein, weil beim elastischen Stosse nichts von der Energie verloren geht.

Fig. 8 gibt an der Hand obiger Betrachtungen das vollständige Bewegungs-Diagramm des Meissels. Nach vollendetem Schlage (Punkt *S*) eilt der Meissel, der Federkraft folgend, in die Höhe (harmonische Bewegung, Sinuslinie). Im Punkte *O* beginnt infolge des Ventilschlusses der Wasserschlag, welcher die Bewegungsrichtung umkehrt und im Punkte *K* endet. Die weitere Strecke KS_2, welche der Meissel der Federkraft entgegen zurücklegt, bildet wieder ein Stück einer Sinuslinie; im Punkte S_2 erfolgt der zweite Meisselschlag und das Spiel beginnt von Neuem.

Fig. 9 gibt (in Naturgrösse) das Fascimile eines Diagramms, welches direkt dem Bohrapparate abgenommen worden ist. Das steile Ansetzen der Linie unmittelbar nach dem Schlage erklärt sich durch den Rückprall der Schneide, welche im gegebenen Falle gegen einen gehärteten Stahlkörper schlug. Im Gestein, selbst im härtesten, ist der Rückprall der Schneide kaum merkbar.

Einstellung des Ventils.

Wie bereits erwähnt, wird die Kraft der Meisselschläge in erster Linie durch die Einstellung des Ventils nach Belieben reguliert, indem die Wassergeschwindigkeit, bei welcher das Ventil sich schliesst, eben die Schlaggeschwindigkeit der Wassersäule bedeutet und diese den auf den Kolben treibend wirksamen Druck bedingt. Das Ventil schliesst sich, sobald die Feder, welche dasselbe gegen den Wasserstrom offen zu halten strebt, durch die Gewalt des durchströmenden Wassers überwunden worden ist; diese Wirkung ist dadurch begründet, dass die von ihrem Sitze nur wenig abstehende Ventilplatte dem Strome einen verengten Querschnitt bietet, durch welchen sich das Wasser mit hoher Geschwindigkeit durchzwängen muss. Der localen

der Energie handelt, deren Grösse wol von der Höhe der Geschwindigkeit, nicht aber von der Richtung derselben sowie auch nicht von dem Sinne der elastischen Deformation (Verdichtung oder Verdünnung) abhängt.

Erhöhung der Geschwindigkeit entspricht ein Druckunterschied zu beiden Seiten der Ventilplatte, ein Überdruck von oben, welcher mit dem Quadrate der Durchflussgeschwindigkeit wachsend die Feder immer stärker belastet und zuletzt überwältigt.

Das Gesetz, welches diesen Vorgang beherrscht, ist folgendes[4]: Nennen wir der Kürze halber den Abstand der Ventilplatte von ihrem Sitze bei unbelasteter Feder den „Normal-Abstand". Dieser Abstand verringert sich bei immer wachsender Geschwindigkeit des Wasserstromes immer mehr und zwar geschieht dies succesive, so lange die Deformation *1/3* des Normalabstandes nicht überschritten hat. Ist aber einmal der Abstand der Platte auf *2/3* des Normalabstandes reducirt, so verwandelt sich das stabile Gleichgewicht in ein labiles und das Ventil wird plötzlich zugeschlagen.

Die Wassergeschwindigkeit, bei welcher der Schlag erfolgt, hängt ab von 2 Faktoren: von der Stärke der Feder (d. h. dem Verhältnisse zwischen deren Widerstande und Deformation) und von dem Normalabstande der Ventilplatte. Die Stärke der Feder beeinflusst die Schlagstärke im geraden Verhältnisse, der Normalabstand im Verhältnisse der dritten Potenz[5].

Wenn das Spiel der Ventilplatte durch einen oberen Anschlag so begrenzt ist, dass die Feder gleich von Anfang an etwas deformirt erscheint, so hat dies auf die Stärke des Schlages keinen Einfluss, soferne diese anfängliche Deformation den dritten Theil des Normalabstandes nicht überschreitet. Eine noch tiefere Stellung des oberen Anschlages vermindert die Schlagstärke und bildet eine unnötige Drosselung des Wasserstromes während seines Anlaufs.

Länge der Schlagsäule.

Den zweiten für die Stärke des Meisselschlages massgebenden Faktor bildet die Länge der Schlagsäule, weil dadurch die Dauer des auf den Kolben wirkenden Druckes bedingt erscheint. Es handelt sich dabei natürlich nicht um die Länge des ganzen Bohrgestänges, sondern um die Entfernung zwischen Apparat und Windkessel. Dieser Letztere bildet nämlich eine nachgiebige, dem Drucke elastisch weichende Stelle, welche die gleichmässig steife

Wassersäule unterbricht und an welcher die Reflexion der Verdichtungswelle in ähnlicher Weise erfolgt, wie (auf dem Gebiete der Akustik) die Reflexion der Schallwelle am Ende einer offenen Pfeife.

Es handelt sich nun um die Wahl der vortheilhaftesten Schlagrohrlänge. Wenn das Rohr sehr kurz ist, so wird der Wasserschlag so früh unterbrochen, dass der Meissel jedesmal nur sehr wenig von der lebendigen Kraft der Wassersäule erhält. Umgekehrt wird ein sehr langes Rohr die Dauer des Stosses derart verlängern, dass die Geschwindigkeit der Masse sich bereits der Schlaggeschwindigkeit c der Wassersäule zu nähern beginnt, mithin die Abgabe der Arbeit an den Kolben zuletzt schon ganz unbedeutend wird. Sowol der eine als der andere extreme Fall muss als ungünstig bezeichnet werden. Die Länge des Schlagrohres soll so gewählt werden, dass dabei ein möglichst grosser Theil der in der Wassersäule enthaltenen Energie durch den Stoss auf die Masse des Meissels sich übertrage, und dies ist der Fall, wenn die stossende Wassermasse der gestossenen Masse des Meissels gleich kommt[6]). Natürlich handelt es sich dabei lange nicht um eine absolute Genauigkeit, indem schon eine angenäherte Gleichsetzung beider Massen die günstigste Übertragung der Arbeit verbürgt.

Ferner lehren die Diagramme (Fig. 5 und Fig. 6 III.), dass die Wassersäule bei Einhaltung der günstigsten Massenverhältnisse durch der Stoss ungefähr $2/3$ ihrer anfänglichen Energie auf den Meissel überträgt, den Rest aber in Form von Geschwindigkeit und Deformation behält und grösstentheils zum eigenen Rückprall verwendet.

Wenn der Kolben-Querschnitt mit dem Querschnitte der Wassersäule nicht identisch, sondern etwa α mal grösser ist, dann geht der Wasserschlag in derselben Weise vor sich, als wären die Querschnitte gleich, dafür aber die Masse des Meissels α^2 mal kleiner, als in Wirklichkeit[7]). Dem entsprechend muss die Länge der Schlagsäule in demselben Verhältnisse verkürzt werden. Will man andererseits bei gegebenem Meissel und Kolben den Querschnitt der Schlagsäule β mal vergrössern, so muss gleichzeitig auch die Länge derselben β mal grösser gemacht werden. Dann wird die Masse der Säule β^2 mal grösser, die Geschwindigkeit β mal kleiner, die lebendige Kraft im Augenblicke des Stos-

ses bleibt dieselbe. Der Unterschied in der Wirkung ist nur der, dass dann der Wasserschlag auf den Kolben einen β mal kleineren Druck ausüben, dieser aber β mal länger dauern wird.

Wassermenge und Betriebsdruck.

Die zum Betriebe des Bohrwidders erforderliche Wassermenge ist bedeutend geringer, als jene Menge, welche anfänglich durch den Apparat geschickt werden muss, um ihn anspringen zu lassen. Diese letztere entspricht nämlich der höchsten momentanen Wassergeschwindigkeit d. i. jener, welche schon das Schliessen des Ventils veranlasst, während der Apparat im Gange nur die durchschnittliche Wassermenge verbraucht, wie sie aus allen drei Perioden: des Anlaufes, des Stosses und des Rückpralls sich ergibt.

Es lässt sich nun theoretisch ermitteln und durch Beobachtung feststellen, dass diese durchschnittlich beim Bohrbetriebe verbrauchte Wassermenge nur etwa 1/3 bis 1/2 der Maximal-Wassermenge beträgt.

Daraus ergibt sich eine gewisse sehr vortheilhafte Eigentümlichkeit des Bohrwidders. Man kann anfänglich eine sehr grosse (die doppelte bis dreifache) Wassermenge durch den Apparat schicken, ohne die eigentliche Bohrthätigkeit einzuleiten. Das Wasser fliesst einfach durch das offene Ventil ohne Hindernis also fast ohne Überdruck durch und spült nur das Bohrloch. Erst wenn die Wassermenge jenen Wert erreicht hat, welcher zum Schliessen des Ventils notwendig ist, springt der Apparat plötzlich an, der Druck im Windkessel steigt und die Wassermenge fällt auf 1/2 bis 1/3 des ursprünglichen Wertes. Dadurch ist man in den Stand gesetzt, jederzeit, wenn nötig, die Bohrarbeit durch eine sehr ausgiebige Leerspülung zu ersetzen, wass bekanntlich bei Tiefbohrungen sich oft als vorteilhaft erweist.

Der Betriebsdruck der Pumpe bedingt die Zeit, welche notwendig ist, um der Wassersäule jedesmal die zum Ventilschlusse nötige Geschwindigkeit zu ertheilen. Es ist somit die Anzahl der Schläge pro Sekunde von dem Pumpendrucke abhängig. Variirt dieser Druck, so variirt nur das Schlagtempo, keineswegs die Stärke der einzelnen Schläge und auch nicht die Wassermenge,

welche einzig und allein durch die Einstellung des Ventils gegeben erscheint.

Das Produkt aus Wassermenge und Druck gibt das Maass der geleisteten Gesammtarbeit.

So hat man denn bei diesem Apparate alle mechanischen Elemente in der Hand, welche für die Bewegung des Meissels d. h. für die Stärke, die Hubhöhe und Zahl seiner Schläge massgebend sind. Mann kann sich demnach allen Betriebs-Bedingungen mit grosser Leichtigkeit anpassen.

Verluste und Wirkungsgrad.

Die theilweisen Arbeitsverluste können eine dreifache Ursache haben:

1. Undichtheit
2. Widerstände in der Leitung
3. Reibung des Kolbens.

Eine Undichtheit im Gestänge lässt sich leicht feststellen und vermeiden. Ein sorgfältig ausgeführtes, mit Talg oder Theer geschmiertes, conisches Gewinde gibt in dieser Richtung fast absolute Sicherheit. Jedenfalls ist die Summe der aus dieser Quelle erwachsenden Verluste nur sehr unbedeutend und das Verhältnis der durch die undichten Stellen entweichenden zur gesammten Wassermenge gibt das percentuelle Maass derselben.

Eine weit grössere Bedeutung besitzt jede Undichtheit innerhalb oder unterhalb der Schlagsäule, also vor Allem im Apparate selbst. Die durch den Wasserschlag hier hervorgerufenen Drücke sind nämlich ohne allen Vergleich grösser (100—300 *atm*), als der Druck der Pumpe (10—25 *atm*). Angesichts so immenser 10 bis 15 mal in der Sekunde vom Positiven ins Negative umschlagender Drücke wird hier die Abdichtung jedenfalls schwieriger. Ausserdem zieht hier jede Undichtheit nicht nur grosse Effectverluste nach sich, sondern wirkt direkt auf den Gang des Apparates störend ein, weil der zum Wiederöffnen des Ventils unerlässliche Rückprall der Wassersäule durch die Undichtheit verloren geht. Ich würde diese Erscheinung mit dem Verhalten eines elastischen Stabes (z. B. eines Spazierstockes) vergleichen, der wol vom Steinpflaster, nicht aber vom weichen Erd-

reich zurückprallt, eben weil er in dasselbe ein wenig einsinkt und seine lebendige Kraft bei dieser Arbeitsleistung verloren geht. Die Rechnung lehrt, dass eine Undichtheit, deren Querschnitt nicht mehr als einige Hundertstel des Rohrquerschnittes beträgt, schon genügt, um die ganze lebendige Kraft der Wassersäule auf diese unnütze Arbeitsleistung, nämlich das Durchpressen des Wassers durch den engen Querschnitt, aufzuzehren. Von einem regelrechten Rückprall ist unter solchen Umständen keine Rede und der Apparat bleibt bei geschlossenem Ventile stehen*).

Glücklicher Weise unterliegt die Sicherung jener zwei Stellen des Apparates, an denen in erster Linie eine schädliche Undichtheit sich einschleichen könnte (nämlich des Ventils und des Kolbens) bei geeigneter Wahl der Materialien und richtiger Formgebung keiner Schwierigkeit. Ein mit entsprechendem Lederstulp oder Spannringen versehener Kolben gibt vollständige Dichtung. Als das zweckmässigste Ventil hat sich ein dünnes, federhartes Stahlplättchen auf gehärtetem Stahlsitze erwiesen.

Die Reibungwiderstände des Wassers in der Leitung wachsen bekanntlich im geraden Verhältnisse mit der Länge des Gestänges, im quadratischen mit der gedrückten Wassermenge; die lichte Weite des Rohres beeinflusst den Reibungswiderstand im Verhältnisse der fünften Potenz.

$$A_1 = 2{\cdot}1\, L\, \frac{W^2}{d^5} \qquad \text{XI.}$$

(A_1 in *atm*, L in *m*, W in *l/sek*, d in *cm*)

Wenn die Pumpe mit A *atm* Betriebsdruck arbeitet, so ist der durch den Reibungswiderstand im Gestänge bedingte Effectverlust (im Verhältnisse zur Gesammtarbeit)

$$\frac{E_1}{E} = \frac{A_1}{A} \qquad \text{XII.}$$

Daraus folgt, dass die Gestängerohre möglichst weit gewählt werden sollen. Nehmen wir beispielweise an: $W = 4$ *l/sek* und $d = 7$ *cm*, so wird sich für je 100 *m* Gestänge ein Druck-

*) Um ihn wieder in Gang zu bringen, genügt es, den Pumpendruck auf einen Augenblick auszusetzen.

verlust von 0·2 *atm* ergeben. Bei *20 atm* Betriebsdruck und 600 *m* Teufe bedeutet dies einen Arbeitsverlust von 6%.

Ein weiterer Verlust entsteht durch die Widerstände des Wassers im Schlagrohre und im (verengten) Ventilquerschnitte. Diese Widerstände sind aber nicht konstant, sie ändern sich vielmehr mit der variirenden Geschwindigkeit der Wassersäule. Nenne ich jenen Druck, welcher beim Anlassen erreicht werden muss, um das Ventil zum ersten Male zu schliessen, (Maximalwiderstand vom Schlagrohr und Ventil) A_2, so ist der mittlere aus dieser Quelle stammende Effectverlust mit hinreichender Annäherung[8])

$$\frac{E_2}{E} = {}^1/_2 \frac{A_2}{A} \qquad \text{XIII.}$$

Um denselben möglichst zu vermindern, empfiehlt es sich

1. bei der Ventileinstellung den stärkeren Wasserschlag eher durch Einführung eines höheren Normalabstands als durch Anwendung allzustarker Ventilfeder zu erzielen,

2. das Schlagrohr eher etwas weiter und entsprechend *) länger zu wählen, als umgekehrt. Da nämlich die Länge des Rohres den Reibungswiderstand nur im direkten Verhältnisse vergrössert, der Querschnitt dagegen in der Potenz $2^1/_2$ zur Geltung kommt, so sinkt der Effectverlust mit der $1^1/_2$-ten Potenz des Querschnittes (mit der dritten Potenz des Schlagrohr-Durchmessers).

Nehmen wir beispielweise die lichte Weite des Rohres 40 *mm* ($Q = 12{\cdot}5\ cm^2$), $L = 20\ m$, $w_2 = 10\ l/sek$ an, so setzt das Schlagrohr dem durchströmenden Wasser einen Maximalwiderstand von 4 *atm*, das Ventil einen solchen von etwa 0·5 *atm* entgegen; zusammen: $A_2 = 4{\cdot}5\ atm$.

Bei einem Betriebsdrucke von 20 *atm* wird dieser Verlust ca. 11% der gesammten Arbeitsmenge betragen.

Die Reibung des Kolbens im Cylinder entzieht sich wol einer genaueren Berechnung; sie wird von der Art der Liederung und von dem Sandgehalte des Wassers abhängen. Bei Anwendung eines Lederstulps schätze ich diesen Widerstand auf circa 10%, bei Spannringen weniger, am wenigsten bei einem langen, genau eingeschliffenen, mit Querrillen versehenen Kolben.

---

*) Siehe oben im Capitel: „Länge der Schlagsäule“, den Zusammenhang zwischen Querschnitt und Länge des Schlagrohres.

Der Gesammtverlust würde demnach unter den angenommenen Umständen 27% der von der Pumpe gelieferten Arbeit, der Wirkungsgrad 73% betragen *).

Die Arbeit, welche zur jedesmaligen Deformation der Feder *F* notwendig ist, bedeutet keinen Verlust. Die Feder gibt nämlich jedesmal, sich wieder ausdehnend, diese Arbeit an die aufwärts eilende Masse in Form von Geschwindigkeit zurück. Dadurch wird beim Zusammenstosse mit der Wassersäule der Rückprall dieser letzteren gegen den Windkessel gefördert und die Menge des verbrauchten Druckwassers im entsprechenden Verhältnisse herabgesetzt.

Um einem eventuellen Misverständnisse vorzugreifen, sei hier noch mit Nachdruck hervorgehoben, dass der Wasserschlag, welcher der Konstruktion des Bohrwidders zu Grunde liegt, nichts gemein hat mit jenem Stosse des Wassers, den man z. B. bei Wasserrädern, eben mit Rücksicht auf den Effectverlust, so sorgfältig zu vermeiden sucht. Dort ist es nämlich ein offener Wasserstrahl, der durch den Anprall zersplittert, so dass seine Energie sich nach allen Seiten hin zerstreut und verloren geht. Hier ist es eine allseitig geschlossene Wassersäule, deren Schlag — wie jeder Stoss elastischer Körper — mit keinem Arbeitsverluste verbunden ist.

---

*) Nach den Versuchen von Eytelwein arbeitet der zur Wasserhebung verwendete hydraulische Widder mit einem Nutzeffecte von 70—90%.

Widder-Tiefbohr-Apparat.

Bei der constructiven Durchführung des Widderprincips für die Zwecke der Tiefbohrung musste man sich den gegebenen Raumverhältnissen (d. i. dem engen Durchmesser des Bohrlochs bei sonst unbegrenzter Länge) anpassen. Der Ausfluss des Wassers musste centrisch und möglichst nahe an der Sohle erfolgen, der Meissel leicht auszuwechseln und der ganze Apparat stark, einfach und leicht zu zerlegen sein.

Diesen Anforderungen entspricht die in Fig. 10 dargestellte Ausführungsform. Der Ventilsitz erhält hier die Gestalt eines cylindrischen Stahlstückes, welches eine centrische Bohrung und um dieselbe herum einen Kranz von parallel durchgebohrten Löchern enthält. Diese Letzteren werden alle gemeinsam von einem darüber spielenden ringförmigen, dünnen, federharten Stahlplättchen, der Ventilplatte, geschlossen resp. geöffnet. Die Ventilfeder sitzt in einer cylindrischen Erweiterung des Ventilsitzes und kann durch Unterlegen von dünnen, ringförmigen Stahlscheibchen verschiedener Stärke in ihrer Wirkung beliebig verstärkt oder geschwächt werden. Ein central angeordnetes Rohrstück bildet die Führung und zwei darauf verstellbare Gegenmuttern den oberen Anschlag der Ventilplatte.

Bei offenem Ventil strömt das Wasser durch den Löcherkranz, durch das Mantelrohr und den Bohrschuh bis an den Meissel, umspült diesen und die Sohle und steigt im Bohrloche als Spülstrom wieder auf. Wird dagegen das Ventil geschlossen, so pflanzt sich der Druck des Wasserschlags durch das Ventilführungsrohr bis in den Arbeitscylinder, ein glashartes Rohrstück, fort, in welchem der Kolben spielt.

Der Meissel (hier als excentrischer Stufenmeissel ausgeführt) ist mit der langen Kolbenstange, an welcher er hängt, behufs Schonung derselben vor Verbiegungen durch ein Kugelgelenk verbunden. Sein cylindrischer Theil findet zwischen vier inneren Rippen des aus Stahl gegossenen Bohrschuhes genaue Führung, sein flacher Theil spielt in einem Schlitze desselben, wodurch die Umsetzbewegung sich vom Gestänge auf den Meissel überträgt.

Die kräftigen Rückzugfedern stützen sich unten gegen den Bohrschuh, oben (durch Vermittlung eines kurzen Rohrstücks)

gegen den Kolben. Es genügt somit den Schuh abzuschrauben, um alle mit dem Meissel verbundenen Theile, (also auch den Kolben mit seiner Lederdichtung) herausziehen, nachsehen und auswechseln zu können.

Die Verbindungsgewinde sind fast ausnahmslos conisch, so dass sie trotz der natürlichen Abnützung immer voll und dicht bleiben und vor dem zufälligen Losrütteln gesichert erscheinen.

Das Schlagrohr, ein starkwandiges aus conisch verschraubten Stücken zusammengesetztes Rohr, erhält eine Gesammtlänge von 10 bis 20 Metern.

Als practischeste Form des Windkessels hat sich jene erwiesen, welche in Fig. 11 dargestellt wird. Die Rohrwand ist hier durch viele kleine Löcher in ein Sieb verwandelt, über welches ein Kautschuk-Schlauch geschoben und an beiden Enden festgeschnürt wird. Über das Ganze kommt ein beiderseits luftdicht dichtendes Stahlrohr, als fester Mantel. Zwischen diesen und den Schlauch wird durch ein kleines Ventilchen Luft bis auf einen gewissen Druck gepumpt. Beim Bohren wirken einerseits der Wasserdruck (hydrostatischer Druck vermehrt um den Pumpendruck) andererseits der Luftdruck einander entgegen und der Kautschuk bildet, sich bald ausdehnend, bald zusammenziehend, die elastische Scheidewand zwischen dem Luft- und dem Wasserraume.

Der Widder-Bohrapparat eignet sich ebenso gut zur gewöhnlichen Meisselbohrung wie zur Kerngewinnung. Um aus gegebener Teufe Gesteinsproben in Form von kurzen Kernstücken zu ziehen, genügt es, den Meissel durch eine Schlagkrone, ein kurzes, unten in einen gehärteten Zackenkranz endendes Stahlrohr, zu ersetzen. Der schnelle, kurze Hub und die genaue Führung der Krone zwischen den Rippen des Stahlschuhs erleichtert die Bildung guter Kerne, welche sodann, nach Einstellung der Bohrthätigkeit, sich von selbst in der Krone mit Schmand festkeilen und gezogen werden können.

Dieses primitive Verfahren hat unstreitig seinen Werth, um von Zeit zu Zeit Aufschlüsse über das durchbohrte Gebirge zu erlangen, eignet sich aber keineswegs zur continuirlichen Kernbohrung. Um auch diese einzuführen, hat der bereits einmal genannte Ingenieur E. Frieh den Apparat in dem Sinne umgebaut, dass er den schlagenden Theil, die Krone, nach aussen verlegte und ihr auf dem central angeordneten, festen, viele Meter langen

Kernrohre eine Führung gab. Diese Anordnung ermöglichte die Abbohrung von beliebig langen Strecken und die Gewinnung von Kernen, die den mit Diamanten erbohrten an Vollkommenheit nicht nachstehen.

Widder-Schachtbohrapparat.

Wie bereits oben gesagt, erscheint der hydraulische Antrieb in erster Linie zur Bethätigung der gruppenweise angeordneten Schachtbohrapparate berufen. Da nun andererseits der Bohrwidder die einzige bisher bekannte zweckmässige Form eines hydraulischen Schlagapparates darstellt, so hat man diesen dem Baue der neuen Schachtbohr-Vorrichtung zu Grunde gelegt.

Fig. 13 stellt eine solche Vorrichtung schematisch dar in der Form, wie sie auf der Lütticher Ausstellung seitens der Deutschen Tiefbohr-A.-G. in Nordhausen zur Vorführung gelangte. Der 1·70 *m* lichter Weite messende Schacht wird von sechs Meisseln beherscht. Die an der Peripherie arbeitenden Apparate erhalten eine etwas nach auswärts geneigte Lage, wodurch die schädlichen Folgen der seitlichen Abnützung der Randmeissel beseitigt erscheinen und der Apparat im Gegentheile die Tendenz erhält, den Schacht immer etwas grösser auszubohren. Werden die Randapparate (wie die Figur es andeutet) gelenkig angeordnet, so erzielt man eine ausgiebige Erweiterung des Schachtes behufs Nachführung der Cuvelage.

Jeder Meissel erhält seine eigene Rückzugfeder und seinen eigenen Kolben. Hingegen ist der Windkessel, das Schlagrohr und das Ventil für alle Apparate gemeinsam (Zus. Pat. zu D. R. P. 135,322). Der gemeinsame Wasserschlag vertheilt sich durch entsprechende Kanäle nach allen Arbeitscylindern.

Je grösser der Durchmesser des zu bohrenden Schachtes, desto mehr Einzelapparate sind anzuordnen. Die Vertheilung derselben ist natürlich so zu treffen, dass auf jede Schneide nahezu dieselbe Menge des zu zerbohrenden Gebirges entfällt.

Nach demselben Principe vieler von einem gemeinsamen Wasserschlage bethätigten Meissel lässt sich leicht auch ein sehr wirksamer Schacht-Nachnahmbohrer mit seitlich wirkenden Schneiden bauen.

Widder-Gesteinsbohrmaschine.

Für die Zwecke der Gesteinsbohrung muss der Widder manchen constructiven Änderungen unterliegen (Fig. 14). Es muss insbesondere für selbstthätige Umsetzung des Meissels gesorgt werden. Der Ausfluss des verbrauchten Wassers erfolgt am besten seitwärts. Man kann auch den Wasserschlag ausserhalb des eigentlichen Bohr-Apparates entstehen lassen und nach demselben durch Gelenkrohre hinleiten.

Bei Tunnelbauten wo mehrere Meissel auf einem Bohrwagen montirt, gegen eine gemeinsame Angriffsfläche arbeiten, wird der Windkessel, das Schlagrohr und das Ventil auf dem Bohrwagen gelagert (Fig. 15) und der von ihnen erzeugte, für alle Apparate gemeinsame Wasserschlag nach den einzelnen Kolben geleitet. Die Construction der Bohrapparate selbst erscheint dadurch wesentlich vereinfacht und ihre Wartung erleichtert.

Das Schlagrohr kann je nach den gegebenen Raumverhältnissen geradegestreckt, zusammengelegt oder zusammengerollt werden.

Der Rückzug des Meissels erfolgt durch Federkraft oder durch entsprechend starke Gummibänder.

Überhaupt lässt hier die constructive Ausführung eine grosse Mannigfaltigkeit zu. So kann z. B. die Spannsäule gleichzeitig als Windkessel dienen, in welchem Falle der Wasserschlag durch ein Gelenkrohr nach dem Apparate geleitet wird (Fig. 16). Diese Anordnung empfielt sich vor Allem dort, wo mehrere Bohrmaschinen auf einer Säule arbeiten. Es kann auch, was für Einzelapparate wol das Einfachste ist, der Windkessel beweglich gebaut und durch ein gerades oder mehrmals zusammengelegtes Schlagrohr mit dem Apparate gelenkig verbunden sein (Fig. 17).

Die Vortheile, welche die Widder-Bohrmaschine anderen Maschinen gegenüber bietet, bestehen, abgesehen von den bereits oben (Seite 7) aufgezählten Vortheilen der hydraulischen Kraftübertragung überhaupt — vor Allem in dem höheren Wirkungsgrade, als dies bei den pneumatisch angetriebenen Maschinen erreichbar ist und im Zusammenhange damit, in einem grösseren Bohreffecte. Die bisher gebräuchlichen Bohrma-

schinen geben nicht mehr als 3—5 Schläge in der Secunde und bohren im harten Gebirge (z. B. Gneissgranitt) nicht mehr als 150 cm^2 in der Minute. Eine nahmhafte Steigerung des Effectes scheint practisch ausgeschlossen, weil die Vergrösserung der Dimensionen (Cylinderweite und Hublänge) das Gewicht der Maschine unverhältnissmässig erhöht und der Anwendung höherer Luftdrücke (über 6 *atm*) eine bedenkliche Abnahme des Wirkungsgrads im Wege steht. Hier sind 10 bis 20 Schläge in der Secunde normal und kann (wie oben dargethan) der Effect eines jeden einzelnen Schlages durch Ventilstellung und Schlagrohrlänge sehr hoch gesteigert werden.

Der hohe, durch den Wasserschlag erzeugte Druck (bis 200 *atm*) ermöglicht hier die Anwendung kleiner Kolbenquerschnitte und verringert die Abmessuugen und das Gewicht der Maschine.

Auch der kleine Hub bietet einen practischen Vortheil. Die seitliche Abnützung der Schneide ist nämlich der Länge des durchlaufenen Weges proportional. Hier ist dieser Weg im Verhältnisse zur geleisteten Arbeit recht klein. Es werden demnach längere Bohrhitzen möglich, weniger Bohrersätze erforderlich, es wird weniger Zeit auf das Auswechseln der Bohrer verwendet werden.

Gibt man der Schlagsäule die gestreckte Form und eine mit der Bewegungsrichtung des Bohrers annähernd zusammenfallende Lage, so erleidet die Maschine fast gar keine Reaction, weil die Kraft des Schlages sich unmittelbar von der Wassersäule auf den Stosskolben überträgt, während der Apparat gleichsam nur die Hülle und Führung für beide Massen bildet. Diese Eigentümlichkeit der Widder-Bohrmaschine, vereint mit ihrem geringen Gewichte, erleichtert die Befestigung derselben und ermöglicht die Anwendung leichter Spannsäulen. Ja, es ist nicht ausgeschlossen, dass man die kleineren Typen dieser Bohrmaschine mit Vortheil ohne besondere Befestigung wird handhaben können.

ANHANG.

Mathematische Begründung.

[1]) Die zwei Hauptfactoren des Effectes: Hubzahl und Hubhöhe beschränken einander gegenseitig. Nachdem aber die Hubhöhe die Stärke des Schlages im directen Verhältnisse, dagegen die Zahl der Schläge nur im Verhältnisse der Quadratwurzel beeinflusst, so ist im Allgemeinen bei grösserer Hubhöhe ein grösserer Gesammteffect zu erreichen. (S. meine Abhandlung „Über die Hubhöhe", Oesterr. Zeitschr. f. Berg. und Hüttenwesen 1895, Nr. 48). Bei canadischen Bohrungen beträgt das Bohrgewicht höchstens 900 *kg.*, die Hubhöhe 60 *cm.*, die Zahl der Schläge 50 in der Minute; bei Bohrungen mit steifem Gestänge: das Bohrgewicht 1500 *kg.*, die Hubhöhe 15 *cm.*, die Zahl der Schläge 120 in der Minute. Berücksichtigt man dabei den Auftrieb des Wassers und sonstige Widerstände, welche den freien Fall verhindern, so ergibt sich in beiden Fällen kaum mehr als 5 *HP* als practisch erreichbare Gesammtleistung an der Sohle.

[2]) Wir denken uns die Wassersäule in unendlich viele Massenelemente getheilt und nennen:

λ die Entfernung zweier Elementarquerschnitte
μ die Masse eines Elementes
Q den Querschnitt der Säule in cm^2
M_1 die Masse des laufenden Meters

Dann ist (die Annäherung g = 10 vorausgesetzt):

$$1) \qquad M_1 = 0.01\, Q$$

und

$$2) \qquad \mu = 0.01\, Q \cdot \lambda$$

Es sei ferner
c die Geschwindigkeit des Anpralls
A der durch den Stoss bewirkte Druck in atm.
Δl bezw. $\Delta \lambda$ die dieser Spannung entsprechenden Deformationen der ursprünglichen Längen l und λ
ε die lebendige Kraft eines Elementes im Augenblicke des Stosses

α die Arbeit, welche notwendig ist, um die ursprüngliche Entfernung λ zweier benachbarten Querschnitte dem elastischen Widerstande entgegen um $\Delta\,\lambda$ zu vermindern.

Stösst die sich bewegende elastische Säule plötzlich gegen ein festes Hindernis, so gelangt das vorderste Element zur Ruhe, sobald seine eigene lebendige Kraft ε durch seinen elastischen Widerstand α aufgezehrt ist. Von nun an bildet es für das nächste Element ein ebenso festes Hindernis, dieses für das dritte usw. Die Verdichtung pflanzt sich auf immer weitere Elemente fort, während die ersten zusammengedrückt bleiben.

Die Grösse der Verdichtung lässt sich leicht ermitteln, wenn man bedenkt, dass α und ε äquivalent sind.

3) $$\varepsilon = \frac{1}{2}\,\mu\,c^2 = 0.005\;Q\,\lambda\,c^2$$

und

4) $$\alpha = \frac{1}{2}\,Q\,.\,A\,.\,\Delta\,\lambda = 0{\cdot}000024\;Q\,\lambda\,A^2$$

Durch Gleichsetzung von $\varepsilon = \alpha$ erhält man

I) $$A = 14{\cdot}43\;c$$

Weicht das Hindernis mit der Geschwindigkeit v zurück, so ist natürlich die relative Schlaggeschwindigkeit: $c - v$ für die Höhe des Druckes maassgebend.

II) $$A = 14{\cdot}5\;(c - v)$$

Die Geschwindigkeit V, mit welcher die elastische Welle sich durch die Wassersäule fortpflanzt, ergibt sich aus folgender Betrachtung:

Wir fassen ein Element ins Auge, welches ursprünglich um die Strecke l vom aufschlagenden Ende entfernt war. Dasselbe bewegt sich so lange mit unveränderter Geschwindigkeit c fort, bis es von der Verdichtungswelle erreicht wird. Die Zeit t, welche notwendig war, damit die mit der Geschwindigkeit V sich fortpflanzende Welle diesen Punct erreichte, ist

5) $$t = \frac{l}{V}$$

In derselben Zeit hat aber das Element die Strecke Δl mit der Geschwindigkeit c zurückgelegt

6) $$t = \frac{\Delta l}{c}$$

Eliminirt man t aus 5) und 6) und bedenkt, dass

7) $$\frac{\Delta l}{l} = 0{\cdot}00048\;A$$

so erhält man

$$V = 1443\;m/sek$$

[3]) Nennen wir:

m die Masse von Meissel und Schwerstange,
v_0 die anfängliche Geschwindigkeit dieser Masse unmittelbar vor dem Stosse (in *m/sek*),
v die (variable) Geschwindigkeit der Masse in der einzelnen Phasen der Stosses (in *m/sek*),
y die (variable) Entfernung (Weg) der Masse von der Stelle, wo der erste Zusammenstoss stattgefunden hat (in *m*),
t die Zeit, welche seit dem Beginne des Stosses verstrichen (in *sek*),
Q den Querschnitt der Wassersäule und des Kolbens (in cm^2).

Die Beschleunigung der Masse nach unten unter dem (variablen) auf den Kolben ausgeübten Drucke A des Wasserschlages wird sein:

$$8)\qquad \frac{dv}{dt} = \frac{AQ}{m} = 14{\cdot}43\,\frac{Q}{m}\,(c-v)$$

woraus durch Integration folgt:

$$9)\qquad v = c - (c - v_0)\,.\,e^{-14{\cdot}43\,\frac{Q}{m}\,t}$$

Da nun

$$10)\qquad v = \frac{dy}{dt}$$

so erhält man durch abermalige Integration y als eine Function von t, somit die Bewegungsgleichung der Masse:

$$11)\quad y = ct - 0{\cdot}0693\,\frac{m}{Q}\,(c - v_0)\left(1 - e^{-14{\cdot}43\,\frac{Q}{m}\,t}\right)$$

[4]) Nennen wir:

p die Fläche der Ventilplatte (in cm^2)
o den Umfang derselben (in *cm*)
x_0 den Normalabstand der Ventilplatte von ihrem Sitze (Abstand bei unbelasteter Ventilfeder) (in *cm*)
x den variablen Werth dieses Abstandes bei succesive zusammengedrückter Feder (in *cm*).
a den (variablen) über dem Ventile herrschenden Überdruck (in *atm*)
y den Druck des Wassers auf die Ventilplatte (in *kg*)
z den dem Wasserdrucke entgegenwirkenden Widerstand der Feder (in *kg*)
w die (variable) im gegebenen Momente durchströmende Wassermenge (in *l/sek*)
u die (variable) Geschwindigkeit des Wassers im engsten Ventilquerschnitte (in *m/sck*)

Der durch das Ventil verengte Durchflussquerschnitt beträgt in cm^2

12) $$q = o\,x$$

Die Durchflussgeschwindigkeit an dieser verengten Stelle ist:

13) $$u = 10\,\frac{w}{ox}$$

Um dem Wasser diese Geschwindigkeit zu ertheilen, ist ein Überdruck von oben erforderlich, der nach den bekannten hydrodynamischen Gesetzen (in *atm*) beträgt:

14) $$a = \frac{1}{10}\,\frac{u^2}{2g} = \frac{1}{2}\,\frac{w^2}{o^2}\,\frac{1}{x^2}$$

(Dabei ist die jedenfalls unbedeutende Geschwindigkeit des Wassers vor dem verengten Querschnitte der Einfachheit halber vernachlässigt)

Dem Überdrucke a entspricht eine Kraftwirkung auf die Ventilplatte

15) $$y = \frac{1}{2}\,\frac{p}{o^2}\,w^2\,\frac{1}{x^2}$$

Diese Gleichung gibt die Beziehung zwischen dem jedesmaligen Abstande der Ventilplatte und dem entsprechenden Drucke des Wassers auf die Ventilplatte. Sie stellt sich graphisch dar (Fig. 7) als eine Reihe von ähnlichen Curven M_{10}, M_{15}, M_{20} u. s. w. für die verschiedenen Werthe des Parameters ($w = 10$ *l/sek*, *15 l/sek*, *20 l/sek* u. s. w.)

Dem Wasserdrucke wirkt die Ventilfeder entgegen, deren Widerstand z der Deformation proportional ist, sich daher im Diagramme graphisch als eine geneigte Gerade N darstellt. Bei der ursprünglichen Lage der Ventilplatte ($x = x_0$) übt eie Feder keinen Druck aus. In dem Masse, als sie auf immer kleinere Werthe von x zusammengedrückt wird, wächst ihr Widerstand z; das zwischen Widerstand und Deformation bestehende constante Verhältnis

16) $$\frac{z}{x - x_0} = tg\,\alpha$$

gibt das Maass der Stärke der gegebenen Feder.

Es herrscht das Gleichgewicht zwischen Wasserdruck und Feder, wenn

17) $$z = y$$

Dies ist in den Schnittpuncten der Linien M und N der Fall. Das Gleichgewicht ist aber entweder ein stabiles oder ein labiles, je nachdem, ob eine kleine Annäherung der Ventilplatte an ihren Sitz den Wasserdruck oder den Widerstand der Feder rascher steigert d. h. ob im Schnittpuncte die betreffende Curve M oder die Gerade N stärker gegen die Horizontale geneigt ist. Im ersteren Falle (Punct A, $x = x_1$) ist das Gleichgewicht stabil, die Ventilplatte erhält sich im Wasserstrome in der Entfernung x_1 von ihrem Sitze. Im zweiten Falle (Punct C, $x = x_3$) wächst

der Wasserdruck so rasch. dass er bei der geringsten Überschreitung der Lage $x = x_3$ die Oberhand gewinnt und die Ventilplatte plötzlich zuschlägt.

Den Übergang von der ersten zur zweiten Art des Gleichgewichtes bildet der Berührungspunct B. Die Abscisse x_2 dieses Punctes ist, wie aus der Gleichung 15 der Curve sich beweisen lässt, für alle Linien M gleich und beträgt:

$$x_2 = {}^2/_3\, x_0$$

Setzt man nämlich

18) $$\frac{dy}{dx} = -\, tg\, \alpha$$

so ergeben sich die Coordinaten des Berührungspunctes

19) $$x_2 = \sqrt[3]{\frac{p}{o^2}\; w^2\; \frac{1}{tg\, \alpha}}$$

20) $$y_2 = \frac{1}{2} \,.\, tg\, \alpha \,.\, x_2$$

Die durch diesen Punct unter dem Winkel α gezogene Tangente schneidet die Abscissenaxe in der Entfernung

21) $$x_0 = x_2 + \frac{y_2}{tg\, \alpha}$$

woraus folgt:

22) $$x_2 = {}^2/_3\, x_0$$

5) Die lebendige Kraft des Stosses ist durch die Geschwindigkeit c_2 gegeben, welche die in Bewegung befindliche Wassersäule unmittelbar vor dem Ventilschlusse besass. Diese Geschwindigkeit ergibt sich aus der Wassermenge w_2, welche der von der Geraden N eben tangirten Linie M entspricht

23) $$c_2 = 10\, \frac{w_2}{Q}$$

Im vorliegenden Falle (Fig. 7) ist beispielweise $w_2 = 25\ l/sek.$

Bei gegebenem Werthe des Normalabstandes x_0 ist sowol der dem Zuklappen des Ventils unmittelbar vorhergehende Durchflussquerschnitt ($q_2 = {}^2/_3\, o\, x_0$) als auch die Deformation der Feder ($d_2 = {}^1/_3\, x_0$) immer gleich und von der Stärke der Feder unabhängig. Eine stärkere Feder wird aber zu derselben Deformation einen grösseren Überdruck des Wassers erfordern und dieser eine im Verhältnisse der Quadratwurzel höhere Wassergeschwindigkeit bedingen. Die lebendige Kraft des Schlages steht somit im geraden Verhältnisse zur Stärke der Ventilfeder.

Dagegen beeinflusst bei einer und derselben Feder der Normalabstand x_0 die Stärke des Schlages im Verhältnisse der dritten Potenz, weil mit zunehmenden Werthe von x_0 sowol der Querschnitt (direct) als die Wassergeschwindigkeit (im Verhältnisse der Quadratwurzel) zunimmt, somit

die Wassermenge w_2 mit der $1^1/_2$-ten Potenz und die lebendige Kraft des Stosses mit dem Cubus von x_0 wächst.

[6]) Die günstigste Schlagrohrlänge lässt sich graphisch am Arbeitsdiagramme (Fig. 6 III.) bestimmen. Nachdem hier die Abscissen (weil die Dauer des Stosses vorstellend), der Länge des Rohres also auch der in der Wassersäule enthaltenen Energie proportional sind und die Ordineten die auf den Meissel übertragene Arbeit bedeuten, so gibt das Verhältniss der Ordinate zur Abscisse gleichzeitig auch das Maass, inwieferne die lebendige Kraft der Wassersäule zur Arbeitsleistung nutzlich verwendet worden ist. Je grösser dieses Verhältniss wird, um so besser. Am günstigsten gestaltet sich dasselbe für den Punct K, in welchem eine durch den Punct O zur Curve tangential gezogene Gerade dieselbe berührt. In diesem Augenblicke sollte der Wasserschlag enden. Bei genauer Construction und Messung zeigt es sich, dass die günstigste Arbeitsübertragung dann stattfindet, wenn die Wassermasse der Masse des Meissels, gleich ist.

[7]) Dies ergibt sich auf folgender Betrachtung:

Ist Q_1 α-mal grösser, als Q, so ist auch der in jedem Augenblicke auf den Kolben wirksame Druck des Wasserschlages, mithin auch die Beschleunigung der Masse α-mal grösser. Da aber andererseits einer jeden Bewegung eines grösseren Kolbens auch eine α-mal grössere Wasserbewegung im Schlagrohre entspricht, so ist der Verlauf des Wasserschlages im Schlagrohre ein solcher, als wäre $Q = Q_1$, dafür aber die Masse des Meissels α^2-mal kleiner.

[8]) Genauer ausgedrückt ist

$$\frac{E_2}{E} = 1 - \frac{A_2}{A} \frac{1}{lognat \frac{A}{A-A_2}}$$

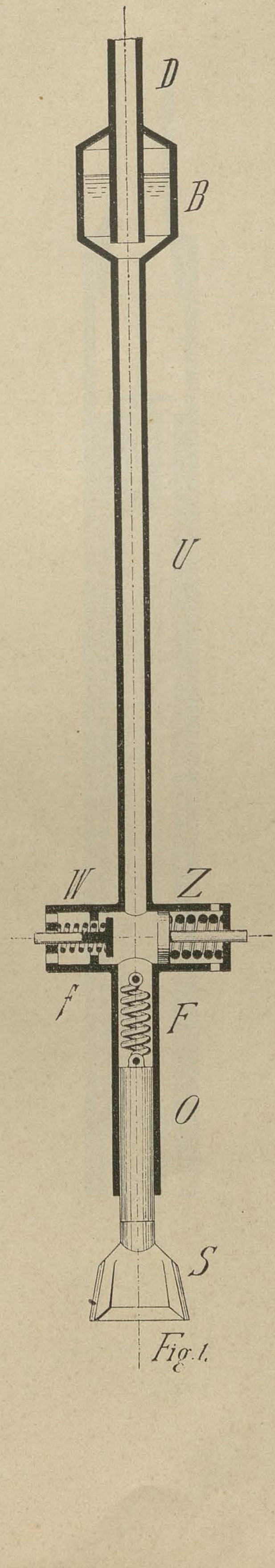


Fig. 1.

VIII

IX

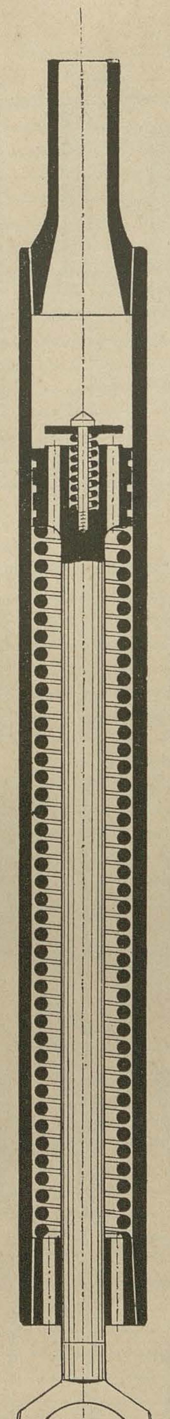


Fig. 2.

XI

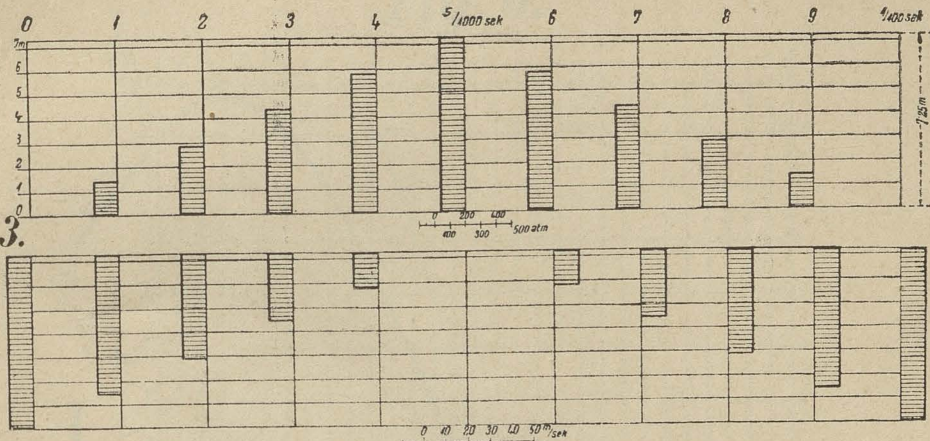


Fig. 3.

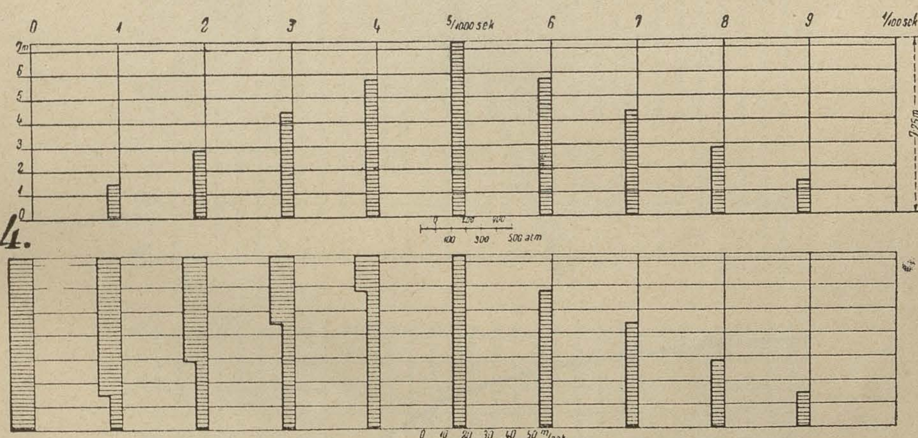


Fig. 4.

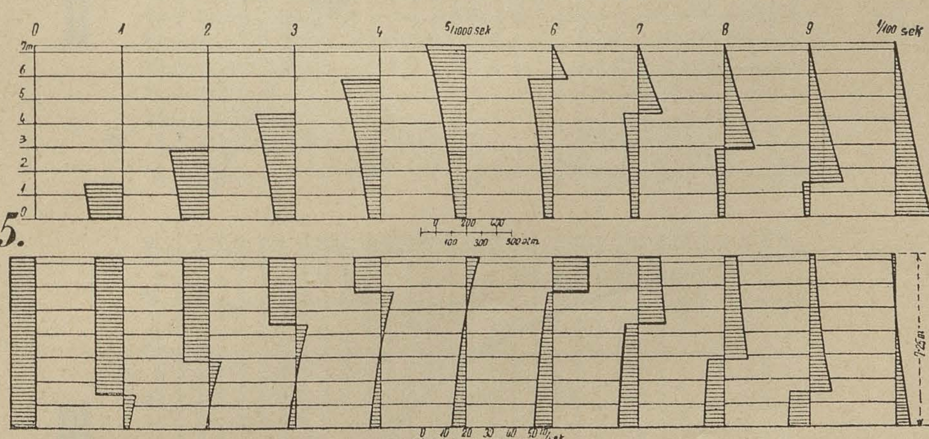
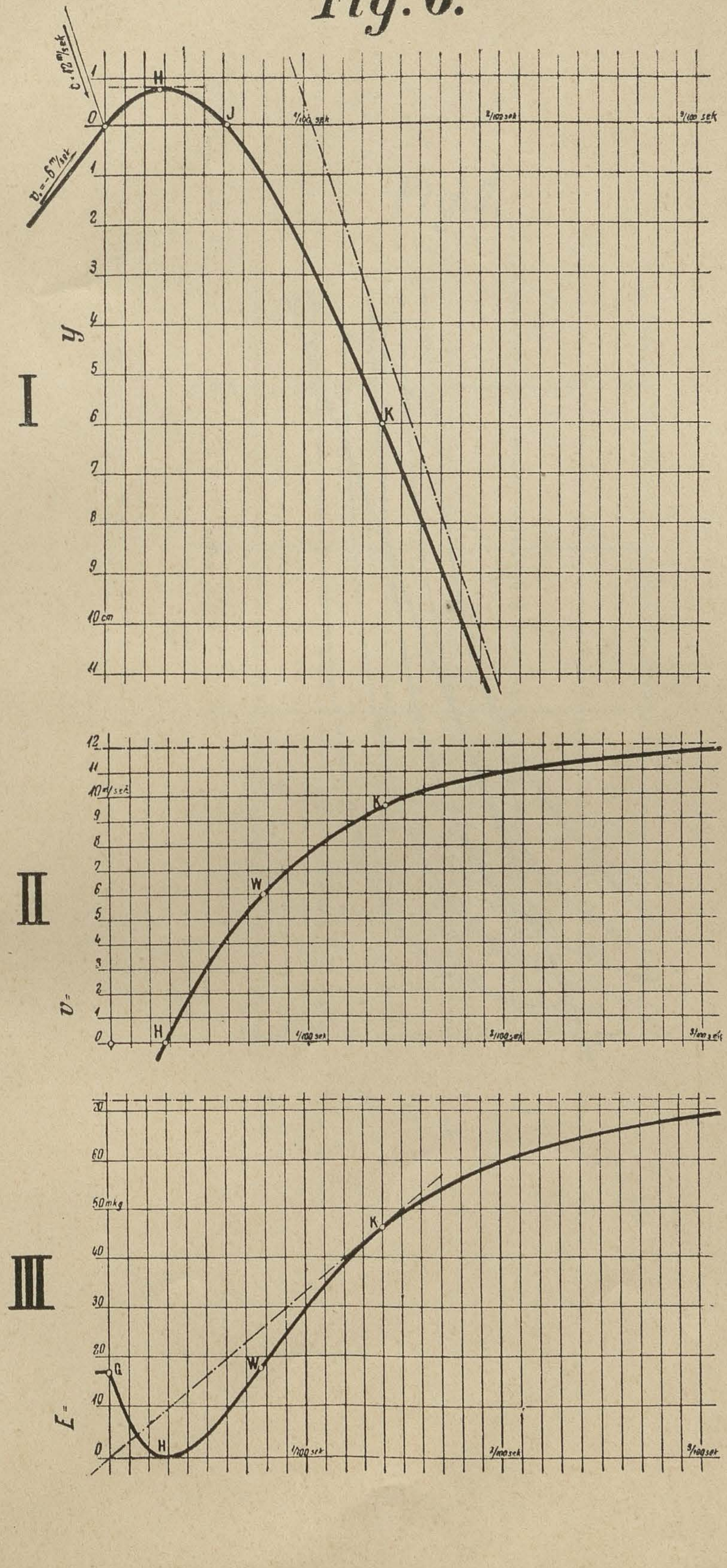


Fig. 5.

XII

XIII

Fig. 6.

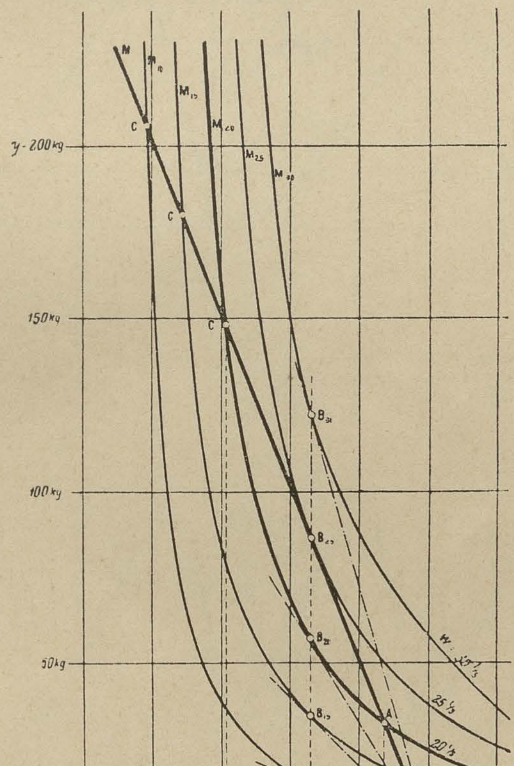


I
II
III
H
J
K
W
G
y
v=
E=
10 cm
10 m/sek
50 mkg
1/100 sek
2/100 sek
3/100 sek

XIV

XV

Fig. 7.



XVI

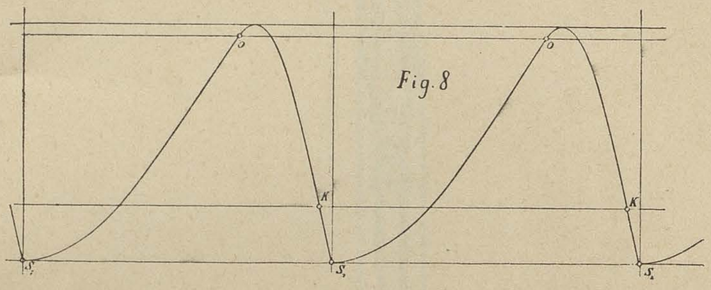
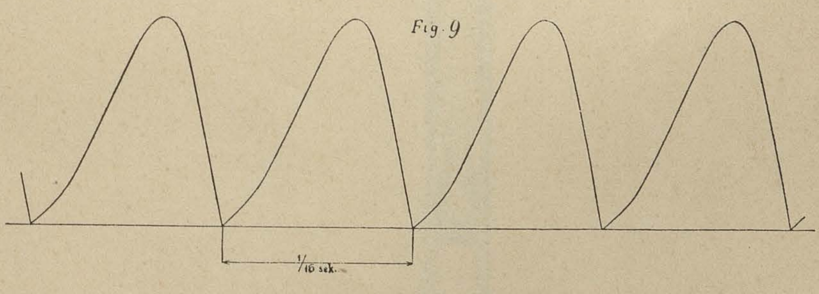


Fig. 8

Fig. 9



XVIII

XIX

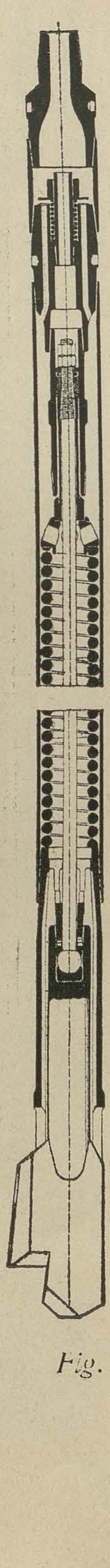


Fig. 10.

XX

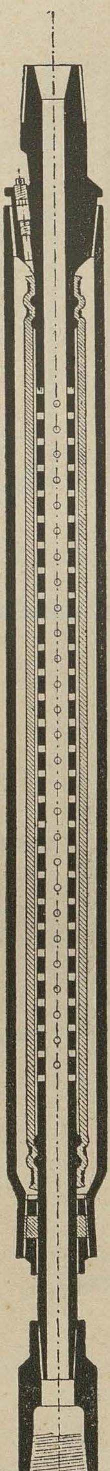


Fig. 11.

XXII

XXIII

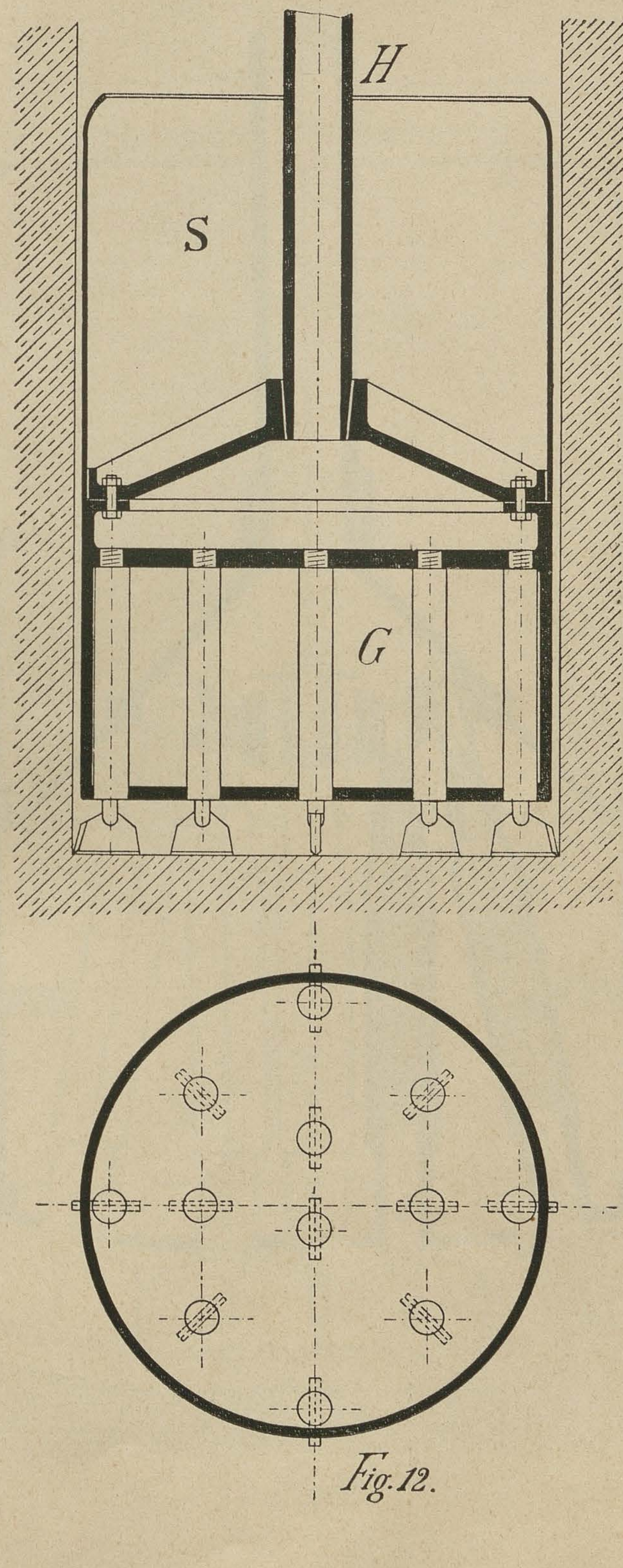


Fig. 12.

XXIV

XXV

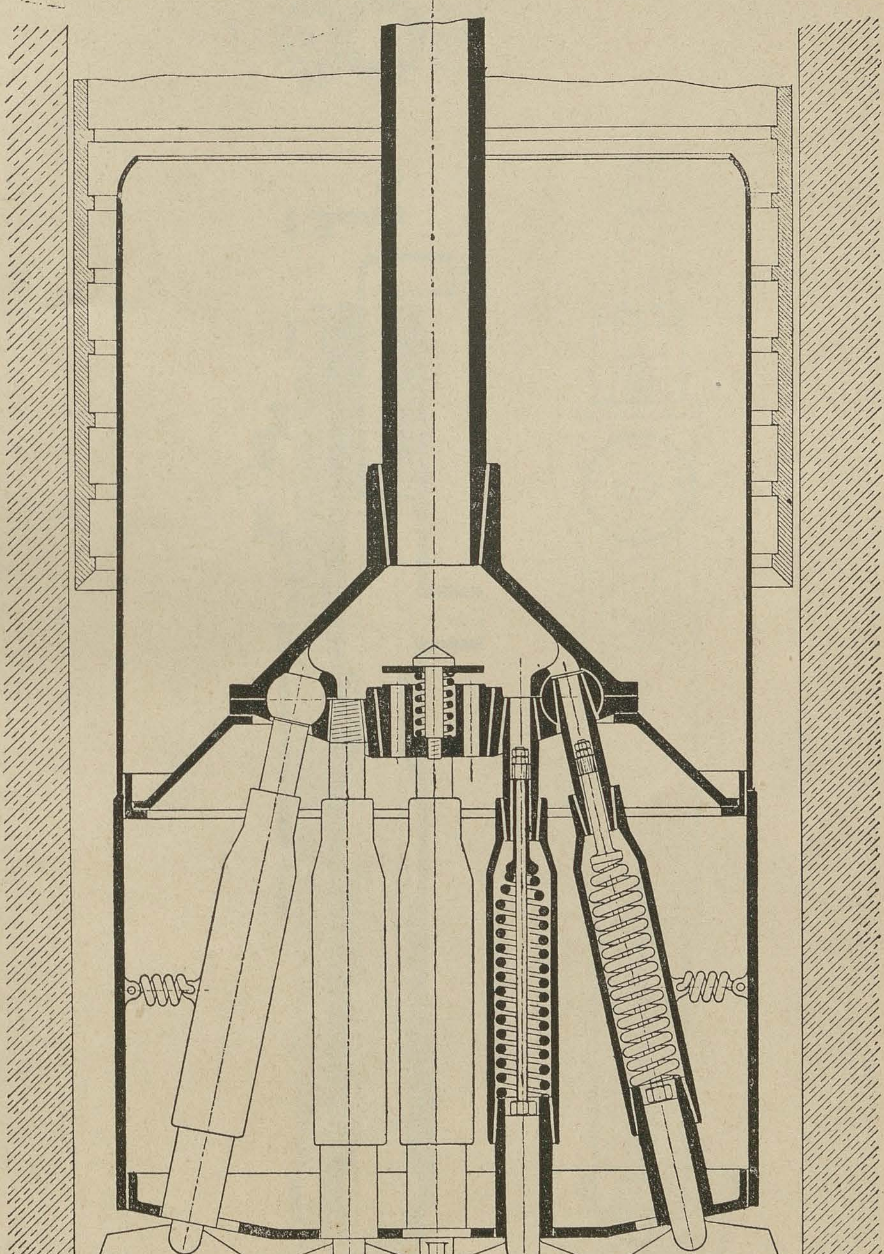


Fig. 13.

XXVI

XXVII

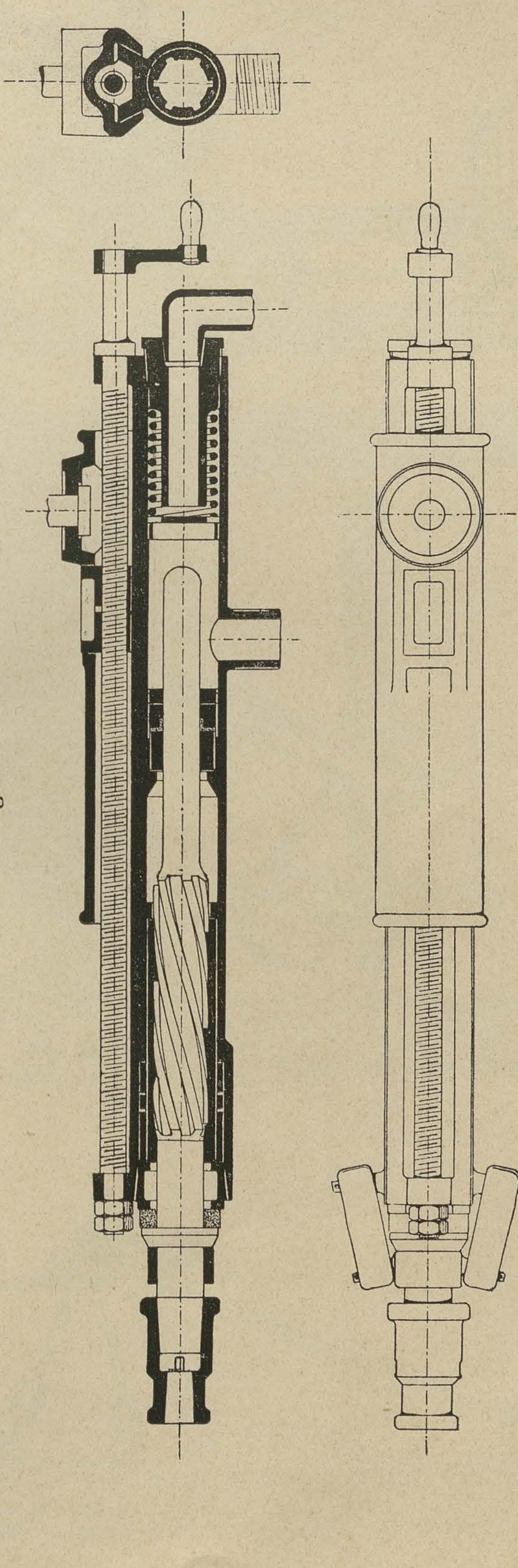


Fig. 14.

XXVIII

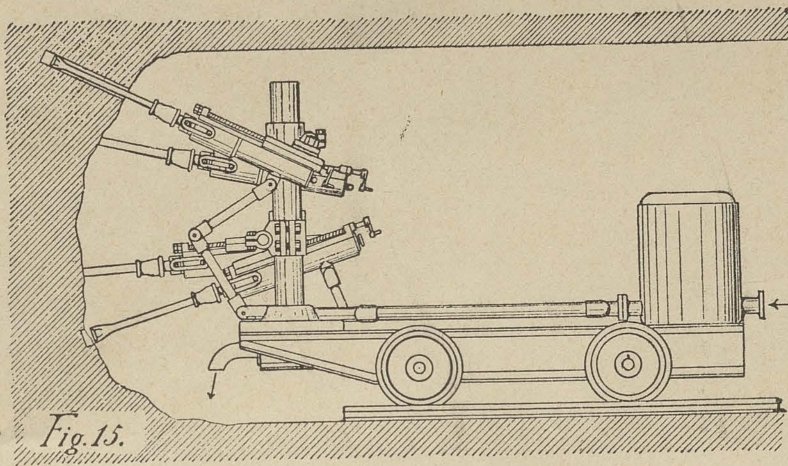


Fig. 15.

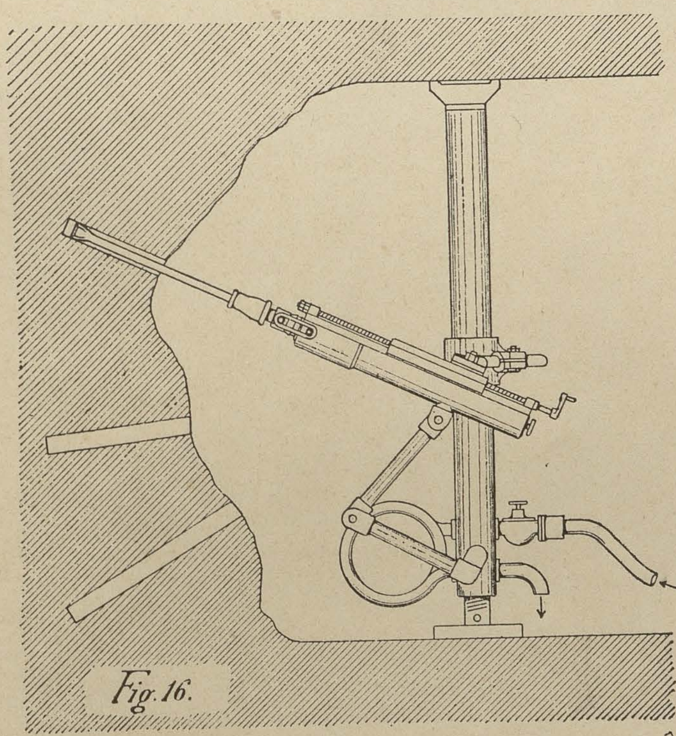


Fig. 16.

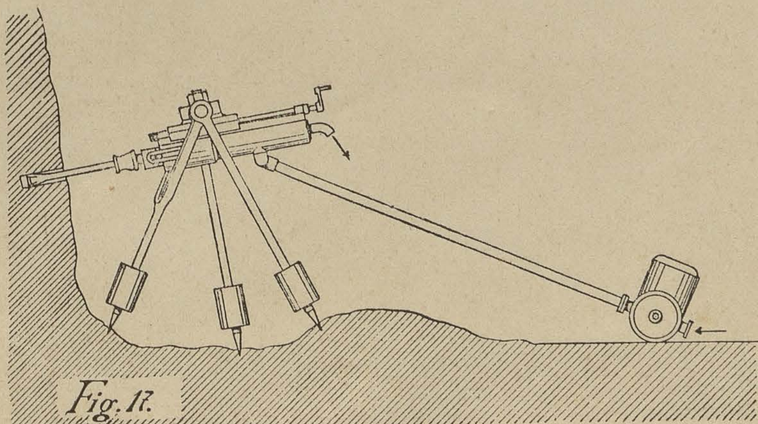


Fig. 17.

XXX

XXXI

XXXII

XXX III

XXXIV

LEMBERG
BUCHDRUCKEREI DES „SŁOWO POLSKIE“.
Verantwort. Leiter J. Ziembiński.